

Р.В. ВЛАСЕНКО, асп., О.В. БЯЛОБРЖЕСЬКИЙ, канд. техн. наук
Кременчуцький Національний університет ім. М. Остроградського

ОЦІНКА СКЛАДОВИХ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ПРИ РОБОТІ СИЛОВОГО АКТИВНОГО ФІЛЬТРУ ЗА СТАНДАРТОМ IEEE 1459-2010

Наявність в промислових системах електроспоживання несинусоїдальних несиметричних навантажень вимагає нових підходів, щодо складових потужності та побудови сучасних компенсуючих пристроїв. Силовий активний фільтр забезпечує компенсацію реактивної потужності, зниження вищих гармонік та симетрування навантажень. В роботі проведено оцінку складових потужності за стандартом IEEE 1459-2010 при роботі силового активного фільтра на несинусоїдальне несиметричне навантаження. Бібл. 7, рис. 2, табл. 1.

Ключові слова: силовий активний фільтр, IEEE 1459-2010, теорія Фрізе.

Вступ. Безперервне зростання встановленої потужності нелінійних, несиметричних і різкозмінних навантажень не завжди супроводжується своєчасним впровадженням технічних рішень, спрямованих на забезпечення якості електроенергії, навіть в розвинених країнах Західної Європи [1].

Вплив несиметрії та несинусоїдальності на елементи систем електропостачання та електроспоживання відомий [2]. Найчастіше тривалі несиметричні і невідновлені режими супроводжуються значними відхиленнями і коливаннями напруг, що викликаються перетоками реактивної потужності, наявністю струмів і напруг вищих гармонік. В даний час, на практиці не існує відмінностей в оцінці симетричного і несиметричного споживання енергії. Зазвичай використовуються тільки дані про активну і реактивну потужності, у кращому випадку враховуються напруги прямої та зворотної послідовностей [2], але цих даних для технічних фахівців недостатньо.

Для підвищення показників якості електричної енергії використовують різноманітні способи та заходи, основою яких є приведення струму до синусоїдальної форми та корекції коефіцієнта потужності. Ефективним технічним рішенням для компенсації реактивної потужності та зниження вищих гармонік є силові активні фільтри (САФ) [4]. САФ являє собою поєднання: 1) компенсатора реактивної потужності; 2) фільтра вищих гармонік; 3) симетруючого пристрою. Якість функціонування САФ оцінюється за певними показниками.

Традиційні вимірювальні прилади не враховують нові вимоги до методів оцінки якості електричної енергії, і використовують застарілі методи, які базуються на припущенні, що струм і напруга є синусоїдальними. Це призводило до значних похибок при розрахунку потужності. Важливі зміни в електроенергетиці, що відбулися в останні 50 років, обумовлені наступними факторами [3]: 1) широке впровадження досягнень електроніки в енергетичне обладнання; 2) обговорення в технічній літературі та подальший розвиток системи термінів, визначень, позначень, електричних величин; 3) експлуатоване вимірювальне обладнання призначене для синусоїдальних сигналів частотою 50/60 Гц; 4) ефективне використання мікропроцесорів і ЕОМ виробниками вимірювальних інструментів для побудови нового, точного і багатофункціонального вимірювального обладнання; 5) розуміння необхідності правильної кількісної оцінки спотворення.

В січні 2000 року IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers* – Інститут інженерів з електротехніки та електроніки) оголосив про створення стандарту IEEE 1459-2000 для вимірювання потужності при синусоїдальній, несинусоїдальній мережі, в умовах балансу і дисбалансу. Десять років потому, в березні 2010 року, був опублікований стандарт IEEE 1459-2010 з важливими змінами та поправками.

Метою статті є проведення оцінки складових потужності електричної енергії при роботі САФ з адаптивним релейним регулятором струму за стандартом IEEE 1459-2010.

Функціональна схема трифазного САФ в структурі системи електроспоживання наведена на рис. 1. Силова частина САФ включає транзисторний перетворювач *VTI-6*, конденсатори *C1*, *C2* і буферний реактор *LI-3*. Реактор *LI-3* в схемі САФ є струмообмежуючим елементом, який завдяки явищу самоіндукції забезпечує формування заданого струму в процесі заряду і розряду конденсатору. Блок формування заданого струму САФ забезпечує розрахунок та генерацію струму, який повинен протікати в

силових колах САФ. Алгоритм роботи блоку базується на існуючих теоретичних уявленнях про енергообмінні процеси в електричних колах та відповідних теоріях потужності. Блок формування імпульсів управління САФ генерує напругу управління ключами перетворювача, яка відповідає визначеному заданому струму САФ.

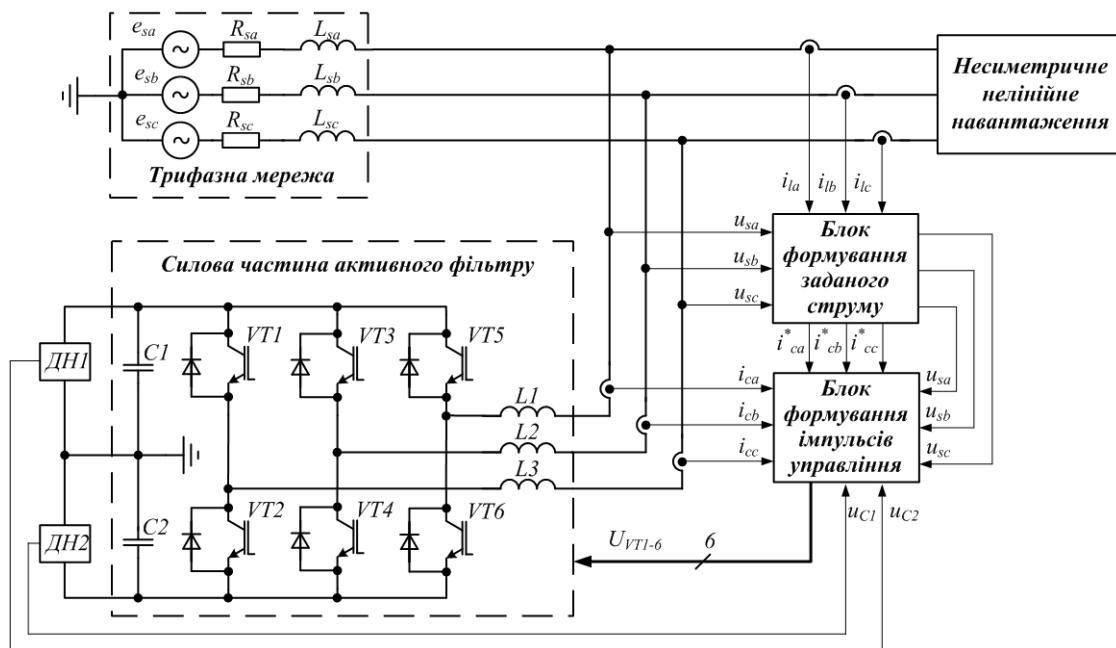


Рисунок 1

Серед методів формування імпульсів управління транзисторами САФ виділяють два основних: широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) та релейне регулювання струму (РРС). Реалізація управління методом ШІМ обумовлює порівняння модулюючої напруги за опорним сигналом фіксованої амплітуди і частоти. При цьому, похибка корегується ПІ-регулятором, параметри якого визначаються відповідно до оптимального режиму роботи [5]. Як зазначено у [5] ШІМ з ПІ-регулятором вимагає детерміновану математичну модель об'єкту управління, яку важко отримати. Зміна режиму навантаження вимагає перерахунку коефіцієнтів та постійних часу регулятора. РРС характеризується стабільністю, швидкою реакцією, точністю, що зумовлено виключно параметрами силової схеми та значенням зони гістерезису релейного елемента. Головним недоліком РРС є змінна частота комутації, що викликана постійним значенням зони гістерезису релейного елемента [6], що призводить до виникнення субгармонік. Для виключення цього недоліку, розроблений [6] адаптивний релейний регулятор струму (АРРС), в якому шляхом введення в блок формування імпульсів управління поточного значення напруги конденсаторів U_{dc1}, U_{dc2} та напруги мережі u_a, u_b, u_c забезпечується формування верхньої та нижньої межі зони гістерезису релейного регулятора [6].

Якість роботи САФ залежить від застосованого методу формування заданих струмів. Розповсюдженими методами визначення заданого струму $i^* \in PQ$ теорія та теорія Фрізе [7]. Але, дані теорії неективні за умови, що мережа, та підключене до мережі навантаження симетричні. Виникнення при несиметрії задачі симетрування струмів потребує корегуванням режиму САФ.

Одним з варіантів оцінки складових несиметрії є застосування стандарту IEEE 1459-2010. Концепцією стандарту IEEE 1459-2010 [3] є відокремлення основної складової напруги U_1 та струму I_1 , окремо від вищих гармонік U_h, I_h та виділення в основній гармоніці складових прямої послідовності U_1^+, I_1^+ [3]. При цьому активна потужність:

$$P = \sum_{a,b,c} (P_1 + P_h) = \sum_{a,b,c} \left[U_1 I_1 \cos \theta_1 + \left(U_0 I_0 + \sum_{h \neq 1} U_h I_h \cos \theta_h \right) \right], \quad (1)$$

де $\theta_h = \alpha_h - \beta_h$ – фазовий зсув гармоніки струму відносно гармоніки напруги.

Для несиметричних режимів [3] вводять ефективну напругу, яка визначається через діючі значення міжфазних напруг U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} , та представляють ефективною напругою за основною гармонікою U_{e1} та ефективною напругою вищих гармонік U_{eH} :

$$U_e = \sqrt{(U_{ab}^2 + U_{bc}^2 + U_{ca}^2)/9} = \sqrt{U_{e1}^2 + U_{eH}^2}; U_{e1} = \sqrt{(U_{ab1}^2 + U_{bc1}^2 + U_{ca1}^2)/9}; U_{eH} = \sqrt{U_e^2 - U_{e1}^2}. \quad (2)$$

Ефективний струм визначають аналогічним чином через діючі значення струмів фаз I_a, I_b, I_c , та представляють ефективним струмом за основною гармонікою I_{e1} та ефективним струмом вищих гармонік I_{eH} :

$$I_e = \sqrt{(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2)/3} = \sqrt{I_{e1}^2 + I_{eH}^2}; I_{e1} = \sqrt{(I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2)/3}; I_{eH} = \sqrt{I_e^2 - I_{e1}^2}. \quad (3)$$

Ефективну повну потужність розділяють на ефективну повну потужність за основною гармонікою та неактивну повну потужність:

$$S_e = 3U_e I_e = \sqrt{S_{e1}^2 + S_{eN}^2} = \sqrt{(3U_{e1} I_{e1})^2 + S_{eN}^2}, \quad (4)$$

причому в останню включають потужності, зумовлені спотворенням струму і напруги відповідно D_{e1}, D_{eU} та повну потужність гармонік S_{eH} :

$$S_{eN} = \sqrt{S_e^2 - S_{e1}^2} = \sqrt{D_{e1}^2 + D_{eU}^2 + S_{eH}^2}, \quad (5)$$

$$D_{e1} = 3U_{e1} I_{eH}, D_{eU} = 3U_{eH} I_{e1}, S_{eH} = 3U_{eH} I_{eH}, \quad (6)$$

Для характеристики несиметричного режиму використовують повну потужність небалансу за основною гармонікою:

$$S_{U1} = \sqrt{S_{e1}^2 - (S_1^+)^2} = \sqrt{S_{e1}^2 - ((P_1^+)^2 + (Q_1^+)^2)}, \quad (7)$$

де S_1^+, P_1^+, Q_1^+ – повна, активна та реактивна потужності прямої послідовності за основною гармонікою:

$$P_1^+ = U_1^+ \cdot I_1^+ \cdot \cos(\theta_1^+), Q_1^+ = U_1^+ \cdot I_1^+ \cdot \sin(\theta_1^+), \quad (8)$$

де U_1^+, I_1^+ – напруга і струм прямої послідовності; θ_1^+ – кут зсуву по фазі напруги і струму [3].

Коефіцієнт потужності розділяють, визначаючи його окремо, для ефективної потужності та прямої послідовності:

$$PF = P / S_e, PF^+ = P^+ / S_1^+.$$

Виходячи з вище викладеного, авторами пропонується два варіанти корекції заданого струму компенсатора в залежності від причин несиметрії.

Варіант 1, коли до трифазної симетричної синусоїдальної мережі підключене трифазне несиметричне несинусоїдальне навантаження. При цьому, визначення активної потужності відбувається за виразом (8), а струм САФ з урахуванням (2):

$$i_c^* = i_l - i_a = i_l - (P_1^+ / U_e^2) u_s. \quad (9)$$

Варіант 2, коли до несиметричної трифазної мережі, якої підключене трифазне несиметричне несинусоїдальне навантаження. При цьому, як показують попередні експерименти, є недостатнім симетрування активної потужності мережі, визначенням її через пряму послідовність (8). Пропонується із отриманого активного струму навантаження виділити струм прямої послідовності:

$$i_c^{**} = i_l - i_a^+ = i_l - [(P_1^+ / U_e^2)]^+ u_s. \quad (10)$$

Для дослідження пропонованих рішень при роботі САФ за схемою (рис. 1) використана модель [6] в якій додатково введені блоки розрахунку відповідно до виразів (1-10). Параметри елементів схеми розраховані: нелінійне навантаження розрахункової потужності $P=14 \text{ кВт}$, $Q=20 \text{ кВар}$ – тиристорний перетворювач з активно-індуктивним навантаженням $R_{ld}=2 \text{ Ом}$; $L_{ld}=0,0116 \text{ Гн}$. Електропостачання здійснюється від трифазної електричної мережі з напругою $U_s=380 \text{ В}$ та частотою 50 Гц . Еквівалентні активний та реактивний опори мережі розраховані виходячи з допустимої втрати напруги на них 7 %. За методикою [5] визначені параметри елементів САФ: частота комутації $f_c=15000 \text{ Гц}$; індуктивність $L=0,0054 \text{ Гн}$; ємність $C1=C2=40 \cdot 10^{-3} \text{ Ф}$; напруга $U_{dc1}=U_{dc2}=1000 \text{ В}$.

Для оцінки впливу алгоритмів формування заданого струму САФ виконано серію експериментів з дослідження електричних та енергетичних параметрів режиму системи: мережа – навантаження – силовий активний фільтр, для варіантів наведених в таблиці 1.

Таблиця 1

№	Конфігурація	Алгоритм заданого струму САФ
1	синусоїдальна симетрична напруга мережі - нелінійне симетричне навантаження (<i>LBG-NBL</i>)	<i>Fr</i> - теорія Фрізе <i>PQ</i> - <i>pq</i> -теорія <i>MF</i> - корекція теорії Фрізе (16)
2	синусоїдальна симетрична напруга мережі - нелінійне несиметричне навантаження (<i>LBG-NUL</i>)	
3	синусоїдальна несиметрична напруга мережі - нелінійне симетричне навантаження (<i>LUG-NBL</i>)	
4	синусоїдальна несиметрична напруга мережі - нелінійне несиметричне навантаження (<i>LUG-NUL</i>)	
5	несинусоїдальна несиметрична напруга мережі - нелінійне несиметричне навантаження (<i>NUG-NUL</i>)	

Нелінійне навантаження в моделі [6] реалізоване тиристорним випрямлячем, несиметрія навантаження (*NUL*) забезпечене шляхом введення в фазу А активного опору потужністю 4500 Вт. Несиметрія напруги джерела живлення (*LUG*, *NUG*) введена в фазу А амплітудою 38 В, несинусоїдальність напруги мережі (*NUG*) виконана третьою гармонікою напруги амплітудою 30 В.

Результати моделювання. Для оцінки роботи САФ обрані наступні показники (рис. 2), причому параметри мережі позначені індексом "s" а навантаження "ld":

- зниження реактивної потужності прямої послідовності (рис. 2, а): $\varepsilon_Q = ((Q_{1ld}^+ - Q_{1s}^+) / Q_{1ld}^+) \cdot 100\%$
- зниження спотворення синусоїдальності струму (рис. 2, б): $\varepsilon_{THDi} = ((THD_{el_{ld}} - THD_{el_s}) / THD_{el_{ld}}) \cdot 100\%$
- зниження потужності спотворення струму мережі D_{el} (рис. 2, в): $D_{el} = ((D_{el_{ld}} - D_{el_s}) / D_{el_{ld}}) \cdot 100\%$
- зниження потужності небалансу (рис. 2, г): $S_{UI} = ((S_{UI_{ld}} - S_{UI_s}) / S_{UI_{ld}}) \cdot 100\%$
- коефіцієнт гармонійних спотворень (рис. 2, д): $K_{HP} = (S_{eN} / S_{e1}) \cdot 100\%$
- коефіцієнт несиметрії K_{AL} (рис. 2, е): $K_{AL} = (S_{UI} / S_{I1}^+) \cdot 100\%$

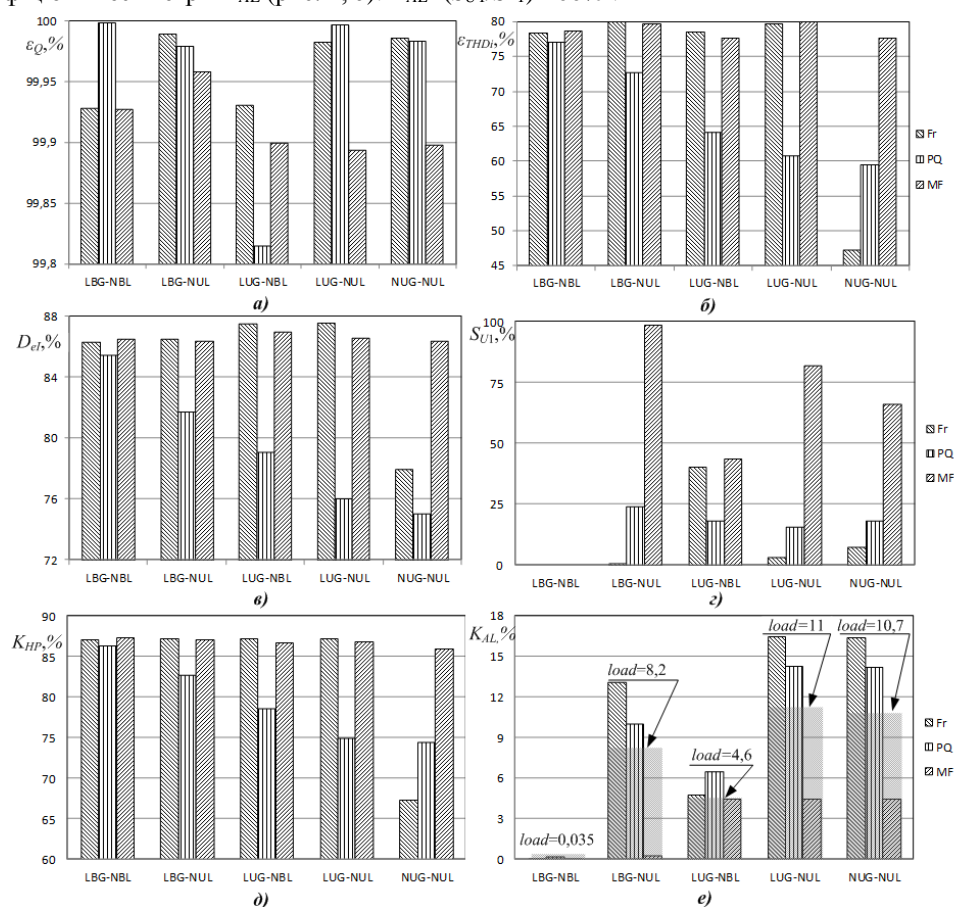


Рисунок 2

Ефективність компенсації реактивної потужності прямої послідовності (рис. 2, а) складає >99 % для всіх алгоритмів формування заданого струму САФ в усіх комбінаціях навантаження. Наявність вищих гармонік, несиметрія, як видно з рис. 2, б, зводять ефективність алгоритмів *Fr* та *PQ* до рівня нижче 60 %, а алгоритму *MF* до рівня нижче 30 %.

на відміну від алгоритму *MF* (77 %). Аналогічна тенденція спостерігається при оцінці потужності спотворення гармоніками струму D_{el} . (рис. 2, в). Досить високі показники вирізняють запропонований алгоритм *MF* (42-94)%, на фоні алгоритмів *Fr* та *PQ*, при оцінці коефіцієнту несиметрії (рис. 2, з). Зниження сумарного негативного впливу Se_N , (рис. 2, д) порівняно з показниками (рис. 2, в) має подібну тенденцію. Це підтверджується значеннями коефіцієнту несиметрії (рис. 2, е), на якому практично для всіх конфігурацій та алгоритмів *Fr* та *PQ* вона підвищується, окрім алгоритму *MF*.

Висновки. В умовах симетричної напруги мережі та симетричного навантаження алгоритм формування струму САФ реалізований на підставі теорії потужності Фрізе чи *PQ*-теорії, забезпечує високу ступінь компенсації реактивної потужності $\varepsilon_Q > 99\%$, зниження рівня гармонік $\varepsilon_{THD} > 75\%$, але за наявності несиметрії ці показники знижуються. Задекларовані стандартом IEEE 1459-2010 методи визначення складових потужності, зокрема потужності прямої послідовності, використано для корегування алгоритму формування заданого струму САФ в умовах несиметрії.

Список літератури

1. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – 3-ие изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
2. Шидловський А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. – К.: Наукова думка, 1985. – 268 с.
3. IEEE Standard 1459-2010 Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions.
4. Давидов О.Ю., Бялобрзеський О.В. Аналіз засобів компенсації реактивної потужності / Вісник КрНУ. – 2010. – №3. – С. 132–136.
5. Vahedi H., Sheikholeslam A., Tavakoli M. Reverse direction of hysteresis bandwidth calculation to fix the switching frequency employed in active power filter // World Applied Sciences Journal. – 2011. – №15 – P. 1007-1015.
6. Власенко Р.В., Бялобрзеський О.В. Адаптивне управління релейним регулятором струму трифазного силового активного фільтру / Електротехніка та електроенергетика. – 2014. – №2 – С. 11-21.
7. Домнин, И. Ф., Жемеров Г.Г., Крылов Д.С., Сокол Е.И. Современные теории мощности и их использование в преобразовательных системах силовой электроники / Технічна електродинаміка, тематичний випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2004. – ч.1 – С. 81-90.

R.V. VLASENKO, O.V. BIALOBRZESKI

Kremenchuk Myhailo Ostrohradskyi National University

ESTIMATE POWER TO STANDARD IEEE 1459-2010 AT WORK ACTIVE POWER FILTER

Availability in industrial systems power consumption non-sinusoidal asymmetric loads require new approaches regarding the components power and construction modern compensating devices. Active power filter provides compensation reactive power, reducing higher harmonics and load balancing. This paper evaluated constituent power of standard IEEE 1459-2010 at working active power filter on non-sinusoidal asymmetrical load. Ref. 7, Fig. 2, Tab. 1.

Keywords: active power filter, IEEE 1459-2010, theory Fryze.

References

1. Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L. Power quality and control of industrial plants. / Moscow, Energoatomizdat, 2000. – 252 p. (Rus)
2. Shidlovskiy A.K., Kuznecov V.G. Improving the quality of energy in electric networks / Kyiv, Naukova dumka, 1985. – 268 p. (Rus)
3. IEEE Standard 1459-2010 Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions.
4. Davydov O.Yu., Bialobrzieski A.V. Analysis tools reactive power compensation // Visnyk KrNU. – 2010. – №3. – Pp. 132–136. (Ukr)
5. Vahedi H., Sheikholeslam A., Tavakoli M. Reverse direction of hysteresis bandwidth calculation to fix the switching frequency employed in active power filter // World Applied Sciences Journal. – 2011. – №15 – P. 1007-1015.
6. Vlasenko R.V., Bialobrzieski O.V. / Adaptive control relay regulator current of three-phase active power filter // Elektrotehnika ta elektroenergetyka. – 2014. – №2 – Pp. 11-21. (Ukr)
7. Domnin I.F., Zhemerov G.G., Krylov D.S., Sokol E.I. Modern theories of power and their use of power electronics converter systems // Tekhnichna elektrodynamika, tematychnyi vypusk "Problemy suchasnoyi elektrotechniky" – 2004. – part 1 – Pp. 81-90. (Ukr)

Р.В. ВЛАСЕНКО, асп., А.В. БЯЛОБРЖЕСКИЙ, канд. техн. наук

Кременчугский национальный университет им. М. Остроградского

**ОЦЕНКА СОСТАВЛЯЮЩИХ МОЩНОСТИ ПО СТАНДАРТУ IEEE 1459-2010 ПРИ РАБОТЕ
СИЛОВОГО АКТИВНОГО ФИЛЬТРА**

Наличие в промышленных системах электроснабжения несинусоидальных несимметричных нагрузок требует новых подходов по составляющим мощности и построения современных компенсирующих устройств. Силовой активный фильтр обеспечивает компенсацию реактивной мощности, снижение высших гармоник и симметрирования нагрузок. В работе проведена оценка составляющих мощности по стандарту IEEE 1459-2010 при работе силового активного фильтра на несинусоидальную несимметричную нагрузку. Библ. 7, рис. 2, табл. 1.

Ключевые слова: силовой активный фильтр, IEEE 1459-2010, теория Фризе.

Надійшла 29.04.2015

Received 29.04.2015